심프슨 근사법을 이용한 MTF 그래프 작성에 관한 연구

A Study on the MTF Graphics using Simpson Approximation

최규식*, 장원석*, 오재익*

Gyu-Shik Che*, Won-Seok Chang*, and Jake Oh*

요 약

측정, 통신, 광정보전달학 등의 분야에서 광 장치를 이용한 광소자의 역할이 점점 증대됨에 따라 이들을 특징 지을 명확한 근거가 필요하게 되었다. 특히 영상시스템에서 이러한 필요를 만족시켜줄 아주 기본적이고도 극히 중요한 측정 파라미터로서 MTF가 있다. 지난 수십년에 걸쳐서 레이저 간섭계, CCD카메라, 컴퓨터를 포함한 새로운 기기들이 등장하여 MTF를 측정하고 계산하는 데에 획기적인 변화를 초래하였다. 그런데 이 MTF를 계산하려면 지루하고도 더딘 과정을 거쳐야 한다. 따라서 우리는 여기서 심프슨 근사법을 이용하여 MTF를 간단히 계산하고 그래프로 구현할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 근사법이긴 하나 정밀값과의 오차가 극히 적어서 실현하기에 매우 유익한 기법이다.

Abstract

There is a clear need for characterizing optical components with the growing role played by optical devices in measurement, communication, and photonics. A basic and useful measuring parameter to meet this need, especially for imaging systems, is the Modulation Transfer Function, or MTF. Over the past few decades new instrument, including the laser interferometer, the CCD camera, and the computer have revolutionized the measurement and calculation of the MTF. This has made what was tedious and involved into virtually an instantaneous measurement. We proposed a Simpson approxiamtion method to create MTF graph and illustrated real example to verify its method in this paper. This method is very useful while it is very useful because its error is very minor and small although its approximation.

keywords : MTF, brightness distibution, line spread function, sharpness, Simpson approxiamtion

I. 서 론

광학기기를 이용하여 찍은 사진은 피사체를 완벽하게 재현하지 못한다. 다만 실제와 가장 가까울 뿐이다. 이상적인 렌즈는 한 점을 그대로 한 점으로 보이게 하지만 실제로는 렌즈를 통과하고 나면 어떤 분포를 가지고 퍼지게 된다. 이러한 현상은 그동안 사용되던 광학시스템 뿐만 아니라 아날로그 및 디지털 카메라, 영상증강기, 필름스캐너와 같은 사진촬영술에도 나타나게 된다. 따라서 렌즈의 특성을 분석하는 일이 중요한 의미를 갖는다. 이와 같은 렌즈의 특성을 평가하는 방법으로 가장 많이 사용되는 것이

* 건양대학교 의공학과

· 제1저자 (First Author) : 최규식

· 투고일자 : 2012년 4월 4일

· 심사(수정)일자 : 2012년 4월 4일 (수정일자 : 2012년 4월 23일)

· 게재일자 : 2012년 4월 30일

MTF(Modulation Transfer Function) 측정법이다. 물론 이것을 렌즈로 한정시킬 필요는 없는데, 렌즈와 함께 센서, 이미지 프로세싱을 거쳐 어떤 최종 결과물을 만들어 내는 장치를 생각해보면 MTF는 그 이미징 시스템의 특성을 측정하는 것으로도 볼 수 있다.

MTF는 순수과학에서 공학에 이르기까지 광범위하게 사용하는 개념으로, 입력신호가 어떤 장치-시스템을 통과하고 난 후 그 물리적 특성이 어떻게 변하는지를 나타내는 함수이다[1]. 이는 한편 정현파형을 촬영해 출력정현파(영상)과의 진폭비를 구해 공간주파수에 대한 진폭을 작성한 것이라 할 수도 있다. 임의의 입력파형인 경우에도 정현파와 조합하여 그 출력파형을 추정할 수 있으며, 입력과 출력의 진폭비만으로 시스템의 해상특성을 표현하는 것이 가능하다. 특히 방사선계에서의 MTF는 입력으로서 X선 강도를 정현파의 패턴으로 사용할 수 있고 공간주파수에서 정현파의 조밀성 표시가 높아서 농도반복시간이 좁다는 특징이 있다. 즉, 주파수가 높아서 주기가 짧아 작은 피사체도 촬영하는 것이 가능하다[2]. MTF를 이용하면 이 방사선 영상들의 해상특성을 평가할 수 있다. 즉, 최종영상의 해상특성 뿐만 아니라 촬영된 영상의 추측도 가능하다는 의미이다.

렌즈 제조회사들은 자체적으로 MTF 수치를 측정해 발표하고 있으며, MTF 차트를 객관적으로 측정하고 있는 기관에서도 각 제조사별 렌즈의 MTF 수치를 확인할 수 있다. 그러나 MTF 차트는 렌즈의 성능을 쉽게 알아볼 수 있는 자료임에도 불구하고 복잡한 그래프와 용어 등으로 인해 많은 사람들이 해석에 어려움을 느끼고 있다. 특히, 변조전달함수를 계산하여 그래프로 구현한다는 것이 매우 어려워서 도출된 방정식에 필요한 데이터를 일일이 대입하여 그 값을 구한 후 이들을 이용하여 그래프를 구하는 것이 일반적이다. 이런 과정에서 많은 노력이 필요할 뿐만 아니라 일반화된 그래프의 작성법이 없어서 영상기기의 특성을 해석하는 데에 어려움이 많다. 참고문헌[2]에서 변조전달함수에 대해서 다방면에 걸친 설명 및 예시에도 불구하고 일반적인 그래프 표현방법을 제시하지 못하고 있다[3, 4, 5]. 특히 [5]에서는 렌즈의 MTF와 다른 특성들을 측정하기 위한 방법들을 자세하게 제시하고 있으나 MTF를 그릴 수 있는 알고리즘을 제공하지는 못하고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 변조전달함수의 일반적인 알고리즘을 이용하여 그래프로 표현할 수 있는 방법으로서 심프슨의 근사치를 이용하는 방법을 개발하고자 한다.

II장에서는 변조전달함수의 정의 및 특성에 관하여 여러 방면에서 본 특성을 연구한다. III장에서는 정량적으로 변조전달함수를 산출하는 방법을 서술한다. IV장에서는 심프슨의 근사법을 이용하여 정량적인 함수를 산출하는 방법을 제시하고 실제값과 근사치와의 오차가 어느 범위에 들어가는가를 검토한다. V장에서는 실례를 들어서 전달함수를 구하고 그래프를 그린다. 그리고 오차범위를 추정한다.

II. MTF의 정의 및 해석

변조전달함수(MTF)란 렌즈의 분해능과 콘트라스트를 객관화한 수치로서 차트는 렌즈의 분해능과 콘트라스트를 객관화한 것이다. 이를 이용하여 가로줄무늬 곡선의 패턴을 촬영하고 영상의 각 부분을 비교하여 측정한 필름과 렌즈의 분해능을 평가할 수 있다. 이는 영상의 질을 결정하는 인자 중 하나인 선예도(sharpness)를 평가할 때 사용하는 기법으로서 응답함수라고도 하며, 시스템의 주파수 응답으로 표시하기도 한다. 주로 전기통신계에서 사용되는 개념으로 광학계와 방사선계에도 도입되어 널리 사용되고 있다.

MTF 수치란 피사체의 상과 렌즈를 통과하여 실제로 촬상면에 맺힌 렌즈의 상의 형태를 비교하여 나타낸 값을 의미한다. 따라서 이상적인 렌즈의 MTF 수치는 당연히 1이 된다. 원래 피사체의 형태와 렌즈를 통과한 빛이 맺힌 상의 형태가 똑같기 때문이다. 그러나 렌즈의 면이 곡면이므로 특성상 피사체에서 나온 빛은 구면수차라는 왜곡이 필연적으로 발생하기 때문에 실제로 MTF의 수치가 1인 렌즈는 존재할 수 없다. 따라서 일반적으로 1보다 작은 값을 갖게 된다[6]. 한편 차트 또는 타켓에 선이 어떻게 그어져 있느냐에 따라 차트의 중심에서 자전거 바퀴살 모양으로 선이 방사상으로 그어지는 것도 있고, 원형으로 수렴

하는 모양으로 그어지는 것도 있다. 전자는 렌즈의 중심축 또는 광축에서 봤을 때 어떤 형체를 형성하는 수평적인 요소가 되고, 후자는 원형의 수직적인 요소가 된다. MTF는 이런 차트를 프로젝터와 렌즈를 통해 투사해서 렌즈가 그 차트(원본)를 재생시키는 정도에 따라 렌즈의 성능을 판단하게 해준다.

MTF는 광학기기의 특성을 평가하기 위해 입력으로 어떤 변조를 가진 패턴, 즉 컨트라스트의 비를 가진 패턴을 사용하여 입력의 변조가 출력단에서 어떻게 변하였는지를 측정함으로써 그 특성을 분석한다.

광학시스템의 성능을 테스트하는 데에 일반적으로 쓰이는 목표 형태는 그림 1(a)에서 지시한 동일한 폭과 깊이를 가진 백색 및 흑색(명암) 막대기의 교차열로 구성된다. 공간간격이 다른 여러 파형의 집합을 테스트중인 시스템으로 영상화하고 라인의 구조를 식별할 수 있는 범위까지의 최고 세밀한 집합을 시스템의 한계해상도라 하며, 밀리미터(㎜)당 라인의 수로 표시한다. 파형이 ㎜당 N개의 라인주파수가 있으면 그 주기는 1/N㎜이다. 이러한 종류의 파형을 광학시스템으로 영상화하면 물체의 각 기하구조라인(즉 무한소의 폭)은 번짐라인으로 영상화되고 이의 단면적이 라인확산함수(line spread function)이다. 그림 1(b)는 막대물체의 휘도의 단면적을 지시하며 그림 1(c)는 영상확산함수가 영상의 “모서리”를 “둥그스름”하게 만드는 형태를 보여준다.

변조함수의 라인의 시스템이 감지할 수 있는 최소변조량을 나타내는 라인과의 교차는 시스템의 한계분해능을 결정하게 된다. 시스템이나 센서가 감지할 수 있는 최소변조량(임계치)을 나타내는 곡선을 AIM(aerial image modulation) 곡선이라 하며 이것은 시스템이나 센서가 반응을 하는 데에 필요한 공간영상변조를 나타낸다[7].

앞에서 검토한 것은 휘도분포(brightness distribution)가 그림 1(b)와 같은 “직각파형”이며 영상조도분포가 광학시스템의 특성 때문에 왜곡되거나 “둥그스름”한 파형에 근거한 것이었다. 그러나 물체의 파형휘도분포가 정현파이면 영상의 분포는 확산함수의 모양에 관계없이 정현파로 서술된다. 이러한 특성때문에 렌즈시스템의 성능을 서술하기 위한 변조전달함수를 광범위하게 적용할 수 있다.

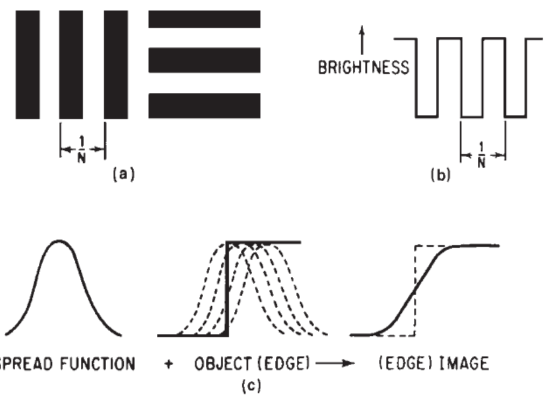

그림 1. 막대타켓의 영상화[7]
Fig. 1. imaging of bar target[7]

주파수 v에 대해 MTF 그림을 그리면 영상형성시스템의 성능을 범용적으로 측정할 수 있으며, 따라서 렌즈에서 뿐만 아니라 필름, 인광체(phospher), 영상관, 눈 및 심지어 카메라를 장착한 항공기와 같은 완성시스템에도 사용할 수 있다.

변조전달함수는 정현파의 주파수(단위길이당 사이클)의 함수로서 물체 대비 영상의 비율이다.

$$MTF(v) = \frac{M_i}{M_o} \quad (1)$$

MTF는 주파수 응답, 정현파응답, 콘트라스트전달로 언급되어 왔다. 여현(또는 정현)함수에 따라 휘도(밝기, 광채)가 변하는 명암교차띠로 구성된 물체를 가정해보면 휘도분포는 수학적으로 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$G(x) = b_0 + b_1 \cos(2\pi v x) \quad (2)$$

여기서 v는 단위길이당 사이클의 휘도변화주파수이고 $(b_0 + b_1)$은 최대휘도, $(b_0 - b_1)$은 최소휘도이다. 그리고 x는 띠에 수직인 공간좌표이다. 이 파형의 변조는

$$M_0 = \frac{(b_0 + b_1) - (b_0 - b_1)}{(b_0 + b_1) + (b_0 - b_1)} = \frac{b_1}{b_0} \quad (3)$$

이다. 이 라인파형을 광학시스템으로 영상화할 때

는 물체의 각 점이 번짐으로 영상화된다. 이 번짐 사이의 에너지분포는 시스템의 상대적인 구경(aperture)과 수차(aberration)에 달려 있다. 선형물체를 취급하고 있으므로 각 라인의 요소의 영상은 그림 1에서 $A(\delta)$로 나타낸 라인확산함수로 서술할 수 있다. 우리는 이제 편의상 방정식 (2)의 차원 x와 $(1/v)$가 영상에 대응하는 차원이라 가정한다. 위치 x에서의 영상에너지분포가 $G(x)$와 $A(\delta)$를 곱한 합이라는 것이 명백하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F(x) = \int A(\delta)\,G(x-\delta)\,d\delta \tag{4}$$

방정식(2)를 (4)에 대입하고 $\int A(\delta)d\delta$로 나누어서 정규화하여 아래와 같이 다시 쓴다.

$$F(x) = b_0 + b_1 \frac{\int A(\delta)\cos(2\pi vx - 2\pi v\delta)d\delta}{\int A(\delta)d\delta}$$
$$= b_0 + b_1\sqrt{A_c^2 + A_s^2}\,cos(2\pi vx - \phi)$$
$$= b_{0+}\, b_1|A(v)|\cos(2\pi vx - \phi) \tag{5}$$

여기서

$$A_c(v) = \frac{\int A(\delta)\cos(2\pi v\delta)d\delta}{\int A(\delta)d\delta} \tag{6a}$$

$$A_s(v) = \frac{\int A(\delta)\sin(2\pi v\delta)d\delta}{\int A(\delta)d\delta} \tag{6b}$$

$$|A(v)| = \sqrt{A_c^2(v) + A_s^2} \tag{7}$$

$$\cos\phi = \frac{A_c(v)}{|A(v)|} \tag{8}$$

결과로서 얻어지는 영상에너지분포 $F(x)$가 아직도 동일한 주파수 v의 여현(cosine) 함수에 의하여 변조되고, 여현분포물체가 언제나 여현분포영상으로 영상화된다. 라인확산함수 $A(\delta)$의 영상의 변조는 다음식과 같다.

$$M_i = \frac{b_1}{b_o}|A(v)| = M_o|A(v)| \tag{9}$$

여기서 $|A(v)|$는 변조전달함수가 된다.

$$MTF(v) = |A(v)| = \frac{M_i}{M_o} \tag{10}$$

III. 변조전달함수의 계산

변조전달함수를 구할 때 [7]의 방법에 의하면 정확한 결과를 도출하기 위해서는 계산시 수많은 점들이 필요하다. 그림 2(a)에서 보는 것과 같은 광선추적데이터로부터 점다이어그램을 가정한다. 라인확산함수는 한 방향의 점다이어그램을 합하여 구한다. 실제로 하나의 증분 Δx를 가정하여 증분을 경계 짓는 라인사이의 모든 점을 계산한다. 그러면 x에 관한 정규화그림2(b)는 라인확산함수 $A(x)$를 나타낸다.

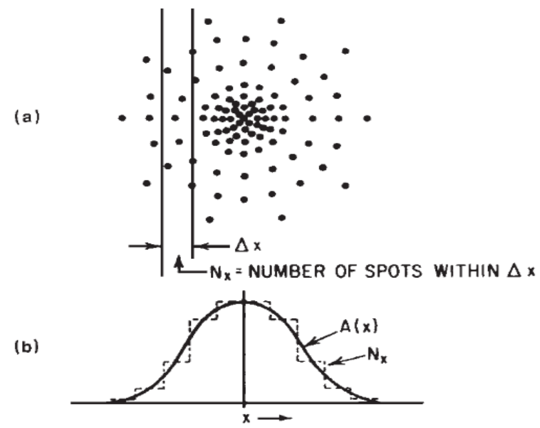

그림 2. 라인확산함수의 생성[7]
Fig.2. creation of line spread function[7]

점다이어그램은 각 증분 Δx에 관한 점(선의교차)들의 수를 합하여 한 방향의 합을 구한다. x에 관하여 그려진 점들의 수는 라인확산함수 $A(x)$를 구하기 위한 것이다. $A(x)$는 피크치를 1로 취한 정규화

함수이다.

실제 확산함수가 있다고 하더라도 통상적인 분석 함수로 나타내기가 극히 어려우므로 적분형태로 된 방정식(6)은 이용할 수가 없다. 근접한 가정(컴퓨터를 사용할 수 있음)을 하면 등가합산방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_c(v) = \frac{\sum A(x)\cos(2\pi vx)\Delta x}{\sum A(x)\Delta x} \tag{11}$$

$$A_s(v) = \frac{\sum A(x)\sin(2\pi vx)\Delta x}{\sum A(x)\Delta x} \tag{12}$$

그러므로 삼각함수에 의해서 $A(x)$의 각 점들을 일일히 곱하여 $A(x)\cos(2\pi vx)$와 $A(x)\sin(2\pi vx)$를 생성한다.

$\int A(x)\cos(2\pi vx)dx$와 $\int A(x)\sin(2\pi vx)dx$는 각 곡선 밑의 면적이 된다. 이 적분에 의하면 x축 밑의 면적은 음의 값이 된다. 이와 유사하게 하면 $\int A(x)dx$는 $A(x)$와 x에 관한 곡선 밑의 면적이다. 주파수 v에 관한 MTF와 φ를 구하기 위해 방정식(7)과 (8)을 이용해야 한다.

수치적인 예로서 $v = 0.1$ 즉, 단위길이당 1/10 사이클인 주파수에서 MTF의 값을 구한다. 사용하고자 하는 여러 x값에 대한 $A(x)$의 값과 라인확산함수를 표로 만든 후, 이러한 값들을 합하여 합을 구한다. 예를 들면 다음과 같다.

$$\sum A(x)\Delta x = +5.10$$
$$\sum A(x)\cos(2\pi vx)\Delta x = +2.51236$$
$$\sum A(x)\sin(2\pi vx)\Delta x = 0.0$$

상기값을 방정식(11)과 (12)에 대입하여 다음 값을 얻는다.

$$A_c(0.1) = \frac{2.51236}{5.1} = +0.4926$$

$$A_s(0.1) = \frac{0.0}{5.1} = 0.0$$

따라서 방정식 (7)에 의하여

$$MTF(0.1) = |A(0.1)| = (0.493^2 + 0^2)^{1/2} = 0.493$$

그러므로 단위길이당 $v = 0.1$사이클인 주파수에서 변조전달함수가 49%라는 것을 알게 된다. 여러 가지 v값에 대하여 이러한 계산을 반복적으로 할 수 있으며, 그 결과로서 그림 3의 것과 유사하게 나타나는, 주파수에 관한 MTF의 그림을 얻을 수 있다. 상기에서 언급한 것처럼 정확한 결과를 얻으려면 Δx 값이 극히 작아야 한다. 일단 주파수영역에서 MTF를 구하게 되면 직각파형 즉, 그림 1에서 보인 막대차트의 변조전달함수에 관한 아날로그함수를 구할 수 있다.

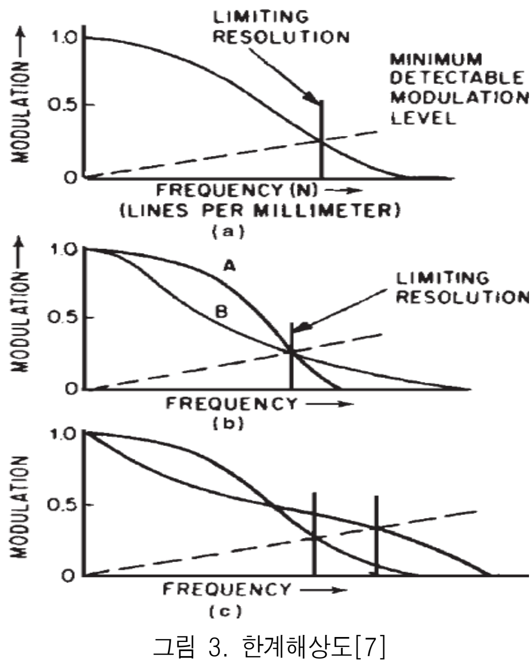

그림 3. 한계해상도[7]
Fig. 3. limiting resolution[7]

Ⅳ. 심프슨공식에 의한 MTF

그러나 심프슨의 공식을 이용하면 상기 3항에서

구한 더딘 방법이 아니라 방정식(6), (7)을 이용하여 주파수 v에 대한 변조전달함수를 쉽게 구할 수 있다. 즉, 좌표상에서 x좌표가 서로 다른 세 점이 동일선상에 있지 않으면 이 세 점을 지나는 포물선이 의적으로 존재한다는 원리를 이용하는 것이다. 심프슨공식은 사다리꼴 대신에 함수의 윗변이 포물선인 도형을 이용하여 적분의 근사치를 얻는 방법이다.

그림에서 함수와 y0로부터 시작하여 y1, y2로 둘러싸인 부분의 넓이는 A는 아래와 같이 표현된다.

$$A = \frac{h}{3}(y_0 + y_1 + y_2) \tag{13}$$

여기서 $h = (b-a)/n$이고 a, b는 적분구간, n은 짝수이다.

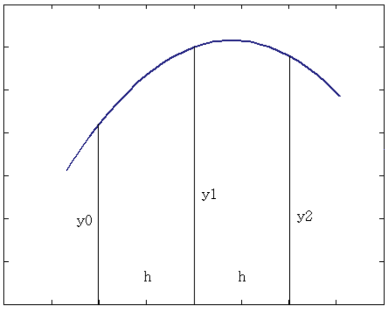

그림 4. 심프슨방법의 예시
Fig. 4. illustration of Simpson method

따라서 연속곡선 $y = f(x)$를 따라 이 공식을 순차적으로 적용하면 $\int_a^b f(x)dx$의 근사치를 얻을 수 있다. 이 공식을 일반화하면 다음과 같은 적분식 S를 얻을 수 있다.

$$S = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \cdots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n) \tag{14}$$

이 공식을 적용할 경우 참값과의 오차의 한계는 다음과 같다.

$$|E_s| \le \frac{b-a}{180} h^4 \max|f^{(4)}(x)| \tag{15}$$

V. 실례

라인확산함수가

$$A(x) = \frac{1}{1+x^2}$$

즉, 우함수로서 최대치는 1이 되는 좌우대칭함수인 경우를 예로 들어본다. 그러면 구하고자 하는 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f(x) = A_c(v) = \frac{\int \frac{1}{1+x^2} cos(2\pi v x)dx}{\int \frac{1}{1+x^2} dx} = \frac{S_2}{S_1}$$

우선 방정식(14)에 의하여 이 라인확산함수의 적분을 구한다. $S_1 = \int_{-6}^{6} \frac{1}{1+x^2} dx$에서

$$y = \frac{1}{1+x^2}$$

로 놓고 적분구간을 0에서부터 6까지로 하여 6개로 분할하면 $h = \frac{6-0}{6} = 1$이므로

$$\begin{aligned} S_1 &= 2 \cdot \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + 4y_5 + y_6) \\ &= 2 \cdot \frac{1}{3}(1 + \frac{4}{2} + \frac{2}{5} + \frac{4}{10} + \frac{2}{17} + \frac{4}{26} + \frac{1}{37}) \\ &= 2.7324 \end{aligned}$$

한편,

$$S_2 = \int_{-6}^{6} \frac{1}{1+x^2} cos(2\pi v x)\, dx$$

에서 편의상 $2\pi v = a$로 놓고 구간과 h는 상기와 동일하게 취하면

$$y_0 = \cos(0) = 1, y_1 = \frac{1}{2}cos(a), y_2 = \frac{1}{5}cos(2a),$$

$$y_3 = \frac{1}{10}cos(3a), y_4 = \frac{1}{17}cos(4a), y_5 = \frac{1}{26}cos(5a),$$

$$y_6 = \frac{1}{37}cos(6a)$$

따라서,

$$S_2 = 2 \cdot \frac{1}{3}\{1 + 2\cos(a) + 0.4\cos(2a) + 0.4\cos(3a) + 0.1176\cos(4a) + 0.1538\cos(5a) + 0.0270\cos(6a)\}$$
$$= 0.6667 + 1.3333cos(2\pi v) + 0.2667\cos(4\pi v) + 0.2667\cos(6\pi v) + 0.0784\cos(8\pi v) + 0.1025\cos(10\pi v) + 0.0180\cos(12\pi v)\}$$

이 식에 의하여 주어진 구간에서 $MTF = \frac{S_2}{S_1}$의 그림을 그리면 아래 그림 5와 같다. 여기서 $v_0 = 0.35$이다. 이 그림을 살펴보면 MTF의 값이 1로부터 시작하여 $\frac{v}{v_o} \rightarrow 1$ 즉, 주파수가 $v = 0.35$로 접근할수록 0으로 접근한다. MTF는 그 값이 1인 것이 이상적일 것으로 생각되나 적외선영상인 경우 실제로는 그 값이 0.4에서 0.6 사이가 최적의 초점을 얻을 수 있는 것으로 알려졌다[8]. 이러한 근사법으로 계산하여 그래프를 그리면 원래 참값과의 오차는 얼마나 될까를 검토하기 위해 참값과의 오차를 계산한다. 방정식(15)에 의하여

$$|E_s| \leq \frac{6-0}{180} \times 1^4 \times \max|f^{(4)}(x)|$$

그런데 $|f^{(4)}(x)| \ll 1$이므로 $|E_s| < 0.033$ 즉, 3.4%가 못된다. 이 정도면 실제값에 상당히 접근한다고 할 수 있다.

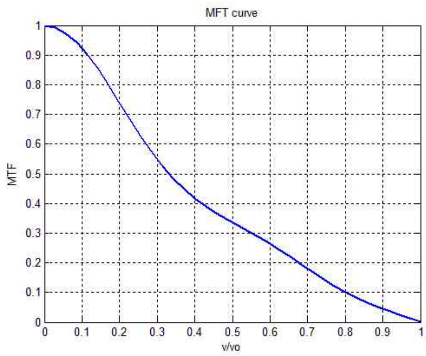

그림 5. 심프슨근사법에 의한 MTF
Fig. 5. MTF plotted by Simpson approximation

VI. 결 론

변조전달함수(MTF)란 렌즈의 분해능과 콘트라스트를 객관화한 수치로서 차트는 렌즈의 분해능과 콘트라스트를 객관화한 것이다. 이를 이용하여 가로줄무늬 곡선의 패턴을 촬영하고 영상의 각 부분을 비교하여 측정한 필름과 렌즈의 분해능을 평가할 수 있다.

그러나 MTF 차트는 렌즈의 성능을 쉽게 알아볼 수 있는 자료임에도 불구하고 복잡한 그래프와 용어 등으로 인해 많은 사람들이 해석에 어려움을 느끼고 있다. 변조전달함수를 계산하여 그래프로 구현한다는 것이 매우 어려워서 도출된 방정식에 필요한 데이터를 일일이 대입하여 그 값을 구한 후 이들을 이용하여 그래프를 구하는 것이 일반적이다. 이런 과정에서 많은 노력이 필요할 뿐만 아니라 일반화된 그래프의 작성법이 없어서 영상기기의 특성을 해석하는 데에 어려움이 많다.

그러나 본 논문에서 제시한 심프슨의 공식을 이용하면 상기 3항에서 구한 더딘 방법이 아니라 주어진 방정식을 이용하여 주파수 v에 대한 변조전달함수를 쉽게 구할 수 있다. 즉, 좌표상에서 x좌표가 서로 다른 세 점이 동일선상에 있지 않으면 이 세 점을 지나는 포물선이 의적으로 존재한다는 원리를 이용하는 것이다. 심프슨공식은 사다리꼴 대신에 함수의 윗변이 포물선인 도형을 이용하여 적분의 근사치를 얻는 방법이다. 실례를 들어서 이 방법에 의하여 MTF를 구해보면 주파수가 $v = 0.35$로 접근할수록 0으로 접근한다. MTF는 그 값이 1인 것이 이상적일 것으로 생각되나 적외선영상인 경우 실제로는 그 값이 0.4에서 0.6 사이가 최적의 초점을 얻을 수 있는 것으로 알려졌다. 이러한 근사법으로 계산하여 그래프를 그리면 원래 참값과의 오차는 얼마나 될까를 검토하기 위해 참값과의 오차를 계산하였다. 오차방정식에 의하여 오차를 계산해보면 그 값이 3.4% 미만이다. 이 정도면 실제값에 상당히 접근한다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] http://user.chol.com/~sloth/misc/mtf.html, "Modulation Transfer Function Engineering", http://user.chol.com/~sloth/misc/mtf.html, 2011.09
[2] 원바리, "의료영상의 평가방법", http://blog.naver.com/ysdom/40008202063. 920.
[3] Kenneth R. Spring, Michael W. Davidson, "Modulation Transfer Function", Nikon Microscopy, *the source for microscopy education.*
[4] G. Lubberts, " The line spread-function and the modulation transfer function of x-ray fluorescent screen-film systems", *Research Laboratories Eastman Kodak Company, vol.105, no.4,* pp909-917,1969.4
[5] Optikos Corporation, "How to Measure MTF anf other Properties of Lenses", *Optikos Corporation,* 1999.7
[6] choalex@nate.com
[7] Warren J. Smith, "modern optical engineering - the design of optical systems', *Mcgraw-Hill*, pp345-pp361, 1990
[8] Wikipedia, "Modulation transfer function(infrared imaging)", *Wikipedia, the free encyclopedia.*

최 규 식 (崔圭植)

1973년 서울대학교 공과대학 전기공학과(공학사)
1983년 뉴욕공과대학 전기공학과 (공학석사)
1993년 명지대학교 전기공학과 (공학박사)
1978년 ~1993년 한국전력기술 중앙연구소 책임연구원
1993년 ~ 현재 건양대학교 의공학과 교수
관심분야 : 생체계측. 의학물리

장 원 석 (張元碩)

인하대학교 전자공학과(학사)
인하대학교 전자공학과(석사)
인하대학교 정보공학(박사)
국방과학연구소 전자통신실근무
(미)UCLA 방문교수
현재 건양대학교 컴퓨터학과 교수
관심분야 : 생체계측 및 전송시스템

오 재 익 (Jake Oh)

1984년 서울대학교 제어계측공학과 학사
1994년 University of Florida, Computer Science 석사
1997년 University of Florida, Computer & Electrical Engineering 박사
1998년 – 2010년 CompuCyte 수석 엔지니어
2010년 – 현재 동강메디칼시스템 연구소장
관심분야: Software architecture, Medical image processing